宁夏近60 a寒潮变化特征及其环流异常

黄 莹[1,2,3]， 王素艳[1,2,3]， 马 阳[1,2,3]， 王 岱[1,2,3]， 张 雯[1,2,3]， 王 璠[1,2,3]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002； 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室，宁夏 银川 750002； 3. 宁夏气候中心，宁夏 银川 750002）

摘 要：利用1961—2020年宁夏逐日最低气温观测资料及同期位势高度、海平面气压场和风场逐月再分析资料，分析近60 a宁夏24 h、48 h、72 h不同历时寒潮、强寒潮、超强寒潮的时空演变特征，并进一步揭示寒潮变化的大气环流异常特征。结果表明：(1) 宁夏近60 a不同强度、不同历时寒潮一致表现为“东多西少、北多南少”的分布特征，这与冷空气路径及宁夏地形有关。(2) 全区寒潮、强寒潮、超强寒潮频次分别占全年总寒潮频次的71.7%、22.6%和5.7%，寒潮以24 h和48 h为主，而强寒潮及超强寒潮不同历时的频次比例相当；各类寒潮存在1—4月递减、10—12月递增的逐月变化特征。(3) 宁夏近60 a寒潮、强寒潮、超强寒潮分别以4.5站次·(10a)$^{-1}$、2.8站次·(10a)$^{-1}$及0.18站次·(10a)$^{-1}$的速率减少，其中24 h及48 h短历时频次减少，但72 h长历时增多；且1960s最多，之后波动减少，1990s达到最少，2000s以来波动增多，20世纪80年代后期寒潮及强寒潮发生突变。(4) 宁夏寒潮突变前后的大气环流呈现出完全相反的分布特征，之前环流形势利于极地冷空气活跃南下，之后则相反；但1961—2020年及突变前后宁夏寒潮的关键影响系统较为一致，当乌山阻高异常偏强、东亚大槽偏强、欧洲西岸高度场异常偏低、贝加尔湖西侧以气旋性环流为主、极地冷高压活跃时，有利于中高纬冷空气活跃南下，宁夏寒潮则偏多，反之则偏少。

关键词：寒潮；时空演变；大气环流；异常分析；宁夏

寒潮是高纬度地区大规模冷空气在特定天气形势下达到一定强度，然后迅速向中低纬侵入的一种灾害性天气，爆发时会伴随着剧烈降温、气压猛升和风速增大，其引发的暴雪、大风和冻雨等天气对农业生产、交通运输、国民经济、人民健康造成重大危害和损失[1-2]。在全球变暖的背景下，气温在不断上升，气候更加不稳定，生态系统更加脆弱，近些年包括寒潮在内的极端冷事件强度随之增大[3]，2008年1月中旬至2月上旬我国出现的大规模寒潮，多地气温突破历史极值，南方地区出现了50 a一遇的持续低温雨雪冰冻天气，造成近1亿人口受灾；2021年2月美国遭遇了一大波寒潮，多地迎来极寒天气，450万家庭断电[4]。因此，寒潮作为中国乃至全球重要的极端天气事件之一，造成的国民经济损失和生命安全危害十分巨大，研究其变化规律及成因是十分必要的。

早在20世纪50年代，陶诗言[5]对东亚寒潮发源地、爆发路径、演变过程等做了大量工作，指出我国寒潮多溯源于北冰洋及西伯利亚和蒙古国，且主要有三条入侵路径，这为早期的寒潮预测奠定了理论基础。随后大量学者进行了更深入的研究，21世纪以来研究内容主要分为两个方面，寒潮的演变特征[6-7]及成因分析[8-9]。其中，王遵娅和丁一汇[10]、钱维宏和张玮玮[11]及魏凤英[12]等指出气候变暖后我国寒潮频次从时间上呈现明显减少且冬季最显著、其次为秋季和春季，空间上呈现为从北向南逐渐减少的分布特征。林晶等[13]、阎琦等[14]、胡春丽等[15]、李红英等[16]分别对我国福建、辽宁、东北及京津冀等地区寒潮进行研究，结果表明不同区域由于地理因素和气候条件的不同，寒潮演变趋势也存在差异。此外，为了解和认识寒潮的异常成因，相关工作从强冷空气堆积动力原因[17-18]、大气环流[19-20]及外强迫因子[21-22]方面进行了分析，乔雪梅等[23]研究发现北方地区寒潮频次变化与大气环流直接相关，主要受

收稿日期：2023-02-17； **修订日期：**2023-05-16
基金项目：宁夏自然科学基金项目(2022AAC03675)；2018年宁夏青年拔尖人才培养工程
作者简介：黄莹(1992-)，女，硕士，主要从事气候变化和预测研究. E-mail: huangying7017@126.com
通讯作者：王素艳. E-mail: nxwsy_cn@sina.com

北极涛动、亚洲区极涡强度和面积的影响；刘美娇等[24]进一步指出当北极涛动指数处于负位相时，寒潮发生频次较多；唐孟琪等[25]则揭示出北极新地岛地区的海冰迅速减少，使得冷空气不易南下，导致我国东北地区春季寒潮频次减少。

宁夏地处半干旱和干旱区的过渡带，南部有六盘山，平均海拔2500 m以上，既是关中平原的天然屏障，又是北方重要的分水岭，北有贺兰山，海拔多在1600~3000 m，既削弱了西北高寒气流的东袭，又阻止了潮湿的东南季风西进。由于独特的地理地貌特征和复杂多样的气候条件使其成为我国优质的农作物生产基地，同时也是寒潮灾害影响严重的主要地区之一。以往有关宁夏寒潮方面的研究多集中在一次过程的诊断和变化特征分析，且仅限于不同强度的寒潮，未开展不同历时寒潮演变特征的相关工作[26-29]。不同历时、不同强度的寒潮造成的影响不同，因此，本文利用1961—2020年宁夏逐日气温观测资料、同期位势高度、海平面气压及风场再分析资料，分析近60 a宁夏不同强度及其不同历时的时空演变特征，并进一步揭示了宁夏寒潮的大气环流异常，为宁夏寒潮预测技术提供思路和防灾减灾工作提供支撑。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

宁夏地处104°17′~107°39′E，35°14′~39°23′N，深居中国内陆，远离海洋，地形复杂，全境海拔1000 m以上，地形从西南向东北逐渐倾斜，地势南高北低，呈阶梯状下降，为典型的大陆性气候，水汽来源不足，各地降水分配不均；选取1961—2020年宁夏20个气象站观测资料用于分析(图1)。

1.2　数据来源

本文选取1961—2020年宁夏20个气象站逐日最低气温资料，美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的500 hPa位势高度场、海平面气压场及700 hPa风场等逐月再分析资料，范围为0°~90°N、0°~180°E，空间分辨率为2.5°×2.5°。其中，气候值为1981—2010年30 a的平均值。

1.3　研究方法

根据中华人民共和国国家标准《寒潮等级》(GB/T 21987—2017)对各类型寒潮进行划分，本文

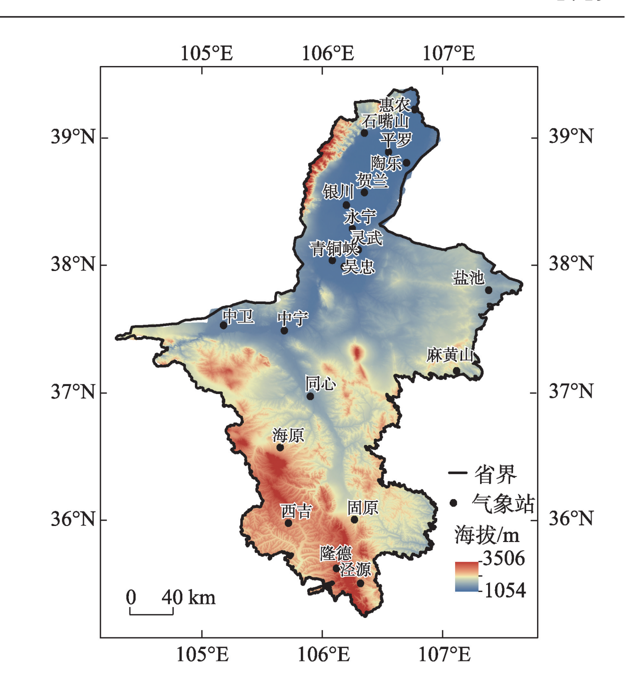


图1　宁夏地理位置和气象站点分布

Fig. 1　Geographical location and distribution of meteorological stations in Ningxia

在统计不同类型寒潮时，若一次过程同时满足多种历时过程定义标准，则以最短历时达到的寒潮标准为准。便于分析，以宁夏单站不同历时的寒潮、强寒潮、超强寒潮发生频次(次)分析空间分布特征，并以全区20个气象站不同历时、不同强度寒潮频次(站次)分析时间变化特征。

利用一元线性回归分析、11 a滑动平均、滑动t检验方法等常用的气象统计方法对宁夏不同强度、不同历时寒潮频次进行时空变化特征分析；采用相关分析、合成分析方法等[30]揭示宁夏近60 a寒潮的大气环流异常分布特征。

2　结果与分析

2.1　寒潮频次空间分布特征

宁夏不同强度寒潮频次的空间分布型均表现为“东多西少、北多南少”的区域性特点(图2)。其中，寒潮有3个高发区，盐池最多，为8次、其次是石嘴山6~7次及西吉5次，最少为海原及泾源，均在3次以下，其余地区为3~6次(图2a)；强寒潮有两个高发区，分别为盐池3.5次及陶乐2.5次，最少为吴忠、中宁及泾源，均在0.75次以下，其余地区为0.75~2.5次(图2b)；超强寒潮频次明显少于寒潮和强寒潮，高发区盐池仅1次，中宁、中卫、银川最少，均在0.2

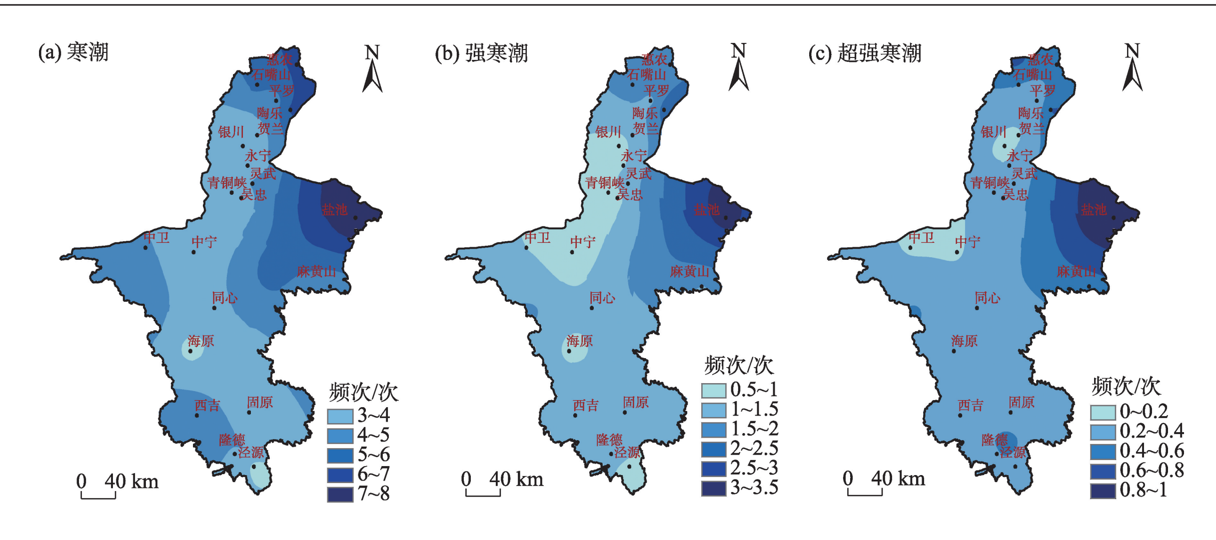


图2 1961—2020年宁夏年均寒潮、强寒潮、超强寒潮频次空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of annual mean cold wave, strong cold wave and exceptionally strong cold wave frequency in Ningxia from 1961 to 2020

次以下，其余地区在0.2~0.8次(图2c)。24 h、48 h及72 h各历时不同强度寒潮过程的空间分布特点与对应的寒潮强度空间分布型一致。东多西少、北多南少的原因主要是冷空气路径和地形，影响宁夏寒潮的冷空气路径有西北偏北、西北、西方和北方路径，4条路径的冷空气均从宁夏北部入侵，西部受到银川平原西侧与内蒙古交界处贺兰山的阻挡、南部受到横贯陕甘宁"天然屏障"六盘山的阻挡使得冷空气均有所减弱。

不同强度寒潮年平均频次在量级上存在明显差异，其中，寒潮最多为81.7站次，其次强寒潮为25.7站次，超强寒潮最少为6.5站次，分别占全年总寒潮的71.7%、22.6%和5.7%。此外，从不同历时的寒潮、强寒潮和超强寒潮来看，寒潮主要以24 h(49.8站次，61.0%)和48 h(26.5站次，32.4%)为主，72 h过程极少，仅有5.4站次；强寒潮及超强寒潮的24 h频次仍然最多，分别为各自的46.7%和44.6%，其次为48 h，分别为32.7%和32.3%，但强寒潮和超强寒潮的72 h占比较寒潮72 h明显增加，分别达到了20.6%和23.1%(图2，表1)。可见，对于强度较低的寒潮以短历时24 h为主；对于强度较强的强寒潮与超强寒潮，其48 h和72 h与短历时同样重要，尤其是超强寒潮的48 h和72 h历时均占有相当大的比重。

2.2 时间变化特征

2.2.1 年际及年代际变化 1961—2020年宁夏寒潮、强寒潮及超强寒潮呈线性减少趋势，减少幅度分别为4.5站次·$(10a)^{-1}$、2.8站次·$(10a)^{-1}$及0.5站次·$(10a)^{-1}$，即从减少趋势来看，寒潮>强寒潮>超强寒潮，寒潮及强寒潮线性趋势通过了0.05的显著性水平检验；其中24 h及48 h不同强度寒潮为减少趋势，且24 h均通过了0.05的显著性检验水平，而72 h寒潮及强寒潮则呈增多趋势(图3，表2)。由此可见，宁夏不同强度短历时寒潮明显减少，而长历时寒潮有所增加。

寒潮、强寒潮、超强寒潮均一致呈现出减少-增多的波动特征，其中，1960s—1990s波动减少，1960s最多，3种类型寒潮分别为99站次、34站次及10站

表1 1961—2020年宁夏多年平均寒潮频次及比例

Tab. 1 Frequency and proportion of cold wave in Ningxia from 1961 to 2020

	寒潮			强寒潮			超强寒潮		
频次/站次	81.7			25.7			6.5		
占总寒潮比例/%	71.7			22.6			5.7		
	24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
频次/站次	49.8	26.5	5.4	12.0	8.4	5.3	2.9	2.1	1.5
占相应寒潮类型比例/%	61.0	32.4	6.6	46.7	32.7	20.6	44.6	32.3	23.1

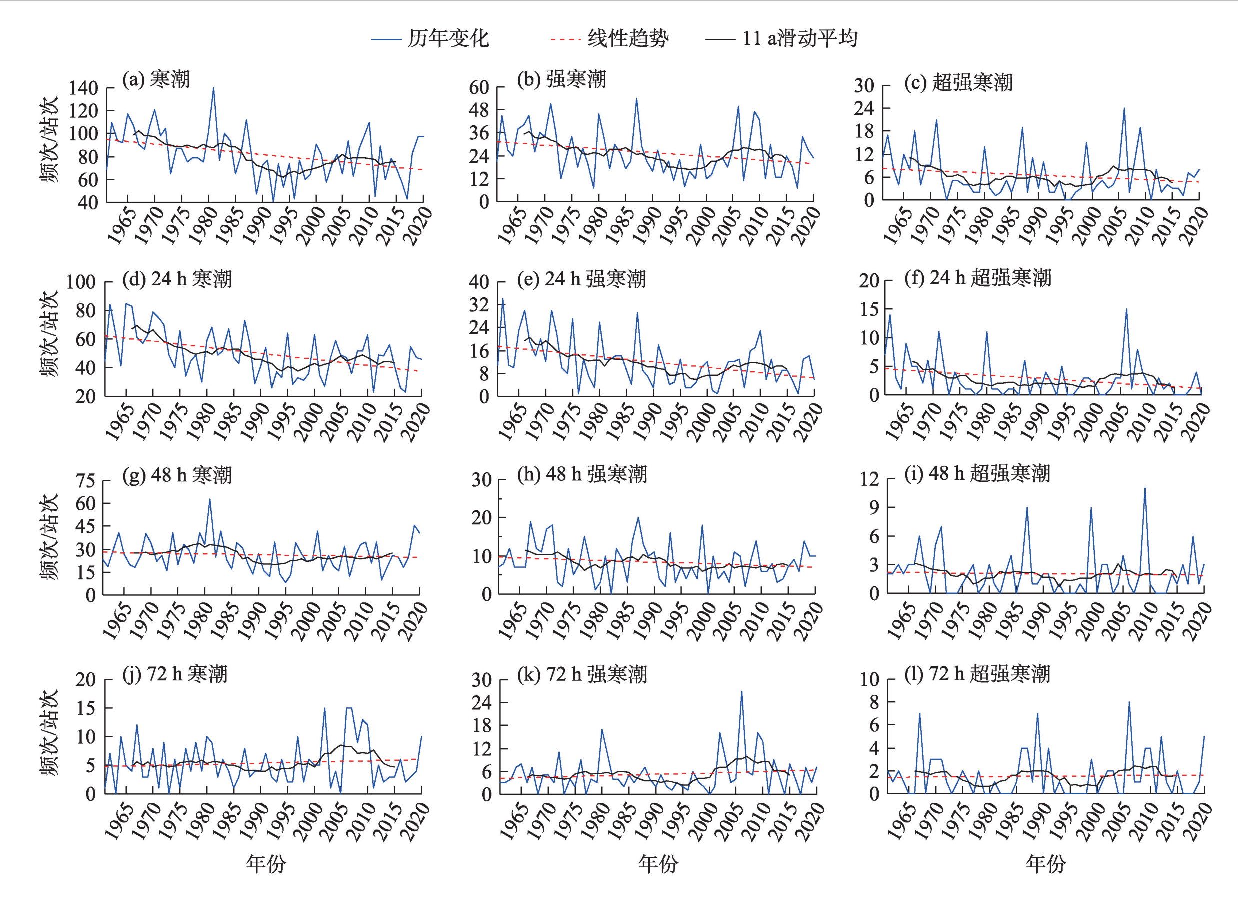


图3　宁夏寒潮、强寒潮、超强寒潮及其24 h、48 h、72 h历时的频次变化

Fig. 3　The frequency variation of cold wave, strong cold wave, exceptionally strong cold wave, and its duration of 24 h, 48 h, and 72 h in Ningxia

表2　1961—2020年宁夏不同等级寒潮的线性趋势

Tab. 2　Trend of cold wave frequency in Ningxia from 1961 to 2020

	总历时	24 h	48 h	72 h
寒潮	−4.5*	−4.2*	−0.5	0.2
强寒潮	−2.8*	−1.9*	−0.4	0.4
超强寒潮	−0.5	−0.6*	−0.1	0

注：*表示通过0.05显著性检验水平。

次，1990s最少，分别为65站次、17站次及4站次，2000以来又转为缓慢增多的趋势（图3a~图3c，图4）。24 h寒潮、强寒潮、超强寒潮同样为1960s最多，为66站次、18站次及5站次，1990s最少，为41站次、8站次、2站次（图3d~图3f，图4）。48 h寒潮、强寒潮、超强寒潮波动幅度相对平缓，分别在30站次、10站次、2站次左右波动（图3g~图3i，图4）。与24 h、48 h不同，72 h的3类寒潮整体呈现波动增加趋势，其中，72 h寒潮与强寒潮2000s之前变化较小，均在5站次以下，之后增多，2000s达到最多值，分别为9站次和10站次；72 h超强寒潮年代际变化更加显著，1960s、1980s、2000s为3个高峰期，均达到2站

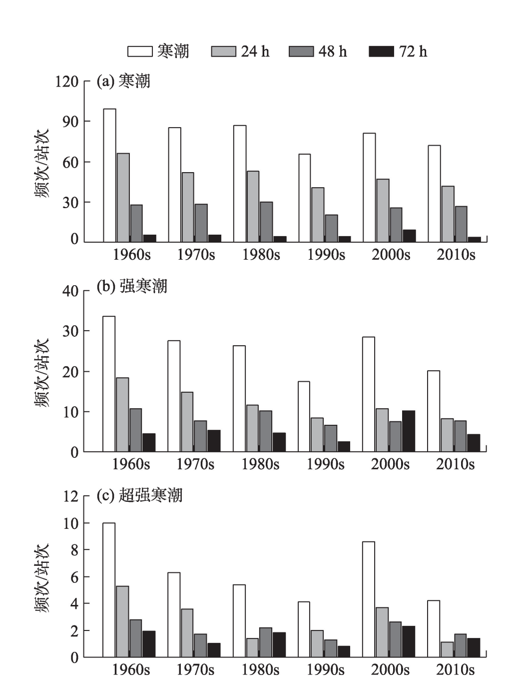


图4　宁夏寒潮、强寒潮、超强寒潮及其不同历时的频次年代际变化

Fig. 4　The interdecadal variation of cold wave, strong cold wave, exceptionally strong cold wave, and their different durations in Ningxia

次(图3j~图3i,图4)。马力等[31]同样指出,寒潮活动呈现"先减后增"的变化特征。此外,通过滑动t检验发现,寒潮、强寒潮于1989年左右出现突变,并通过了0.01的显著性检验水平,这与20世纪80年代后期全球气候明显增暖的变化一致[32]。

2.2.2 月际变化特征 宁夏各类寒潮主要发生在10月—次年4月,5月和9月较少发生,6—8月无寒潮发生(图5)。寒潮和强寒潮总频次表现为1月最多(分别为16站次和5.2站次)、1—4月递减,10—12月递增的演变特征;超强寒潮则表现为1月最多(1.4站次)、4月次多(1站次),1—5月波动递减、9—12月递增的演变特征。其中,10月—次年4月全区寒潮、强寒潮、超强寒潮总频次分别为80.9站次、25.1站次、6.1站次,分别占全年各自的99%、98%、95%。从不同历时来看,与其对应的寒潮强度总频次的演变特征一致,维持1—4月递减、10—12月递增的变化特征,且各历时在10月—次年4月的频次均达到95%以上;但各历时峰值存在差异,24 h和72 h强寒潮、24 h超强寒潮为4月最多,其余均为1月(图5)。

2.3 宁夏寒潮与大气环流异常分布

大气环流往往是决定寒潮气候变化的直接动力因子,上述分析发现宁夏各类寒潮时间演变特征明显,且多在20世纪80年代后期发生突变,因此,以整个时段(1961—2020年)、突变前30 a(1961—1990年)以及后30 a(1991—2020年)揭示了宁夏寒潮(该部分有关寒潮分析,是指全年发生的总寒潮事件,包括寒潮、强寒潮、超强寒潮强度事件,以"寒

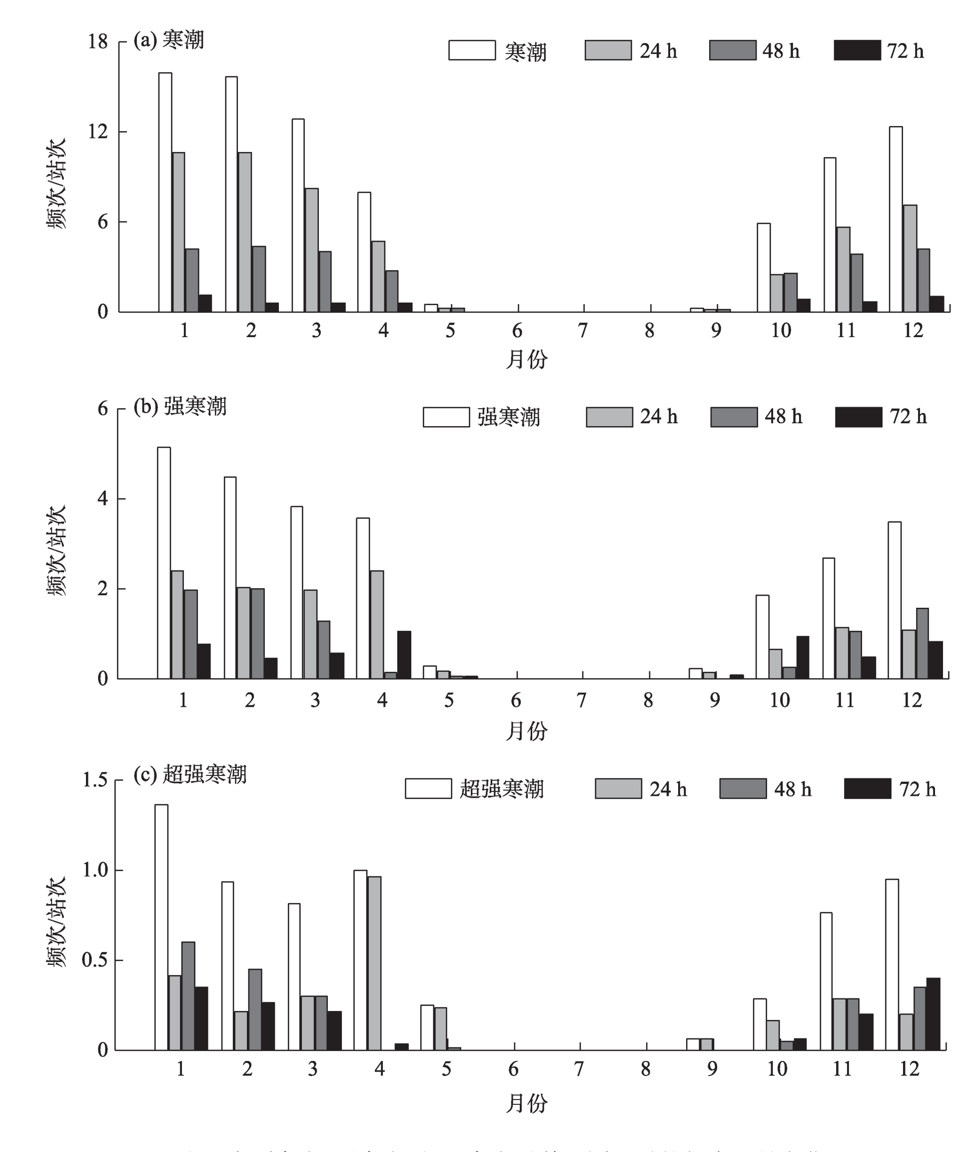


图5 宁夏寒潮、强寒潮、超强寒潮及其不同历时的频次逐月变化

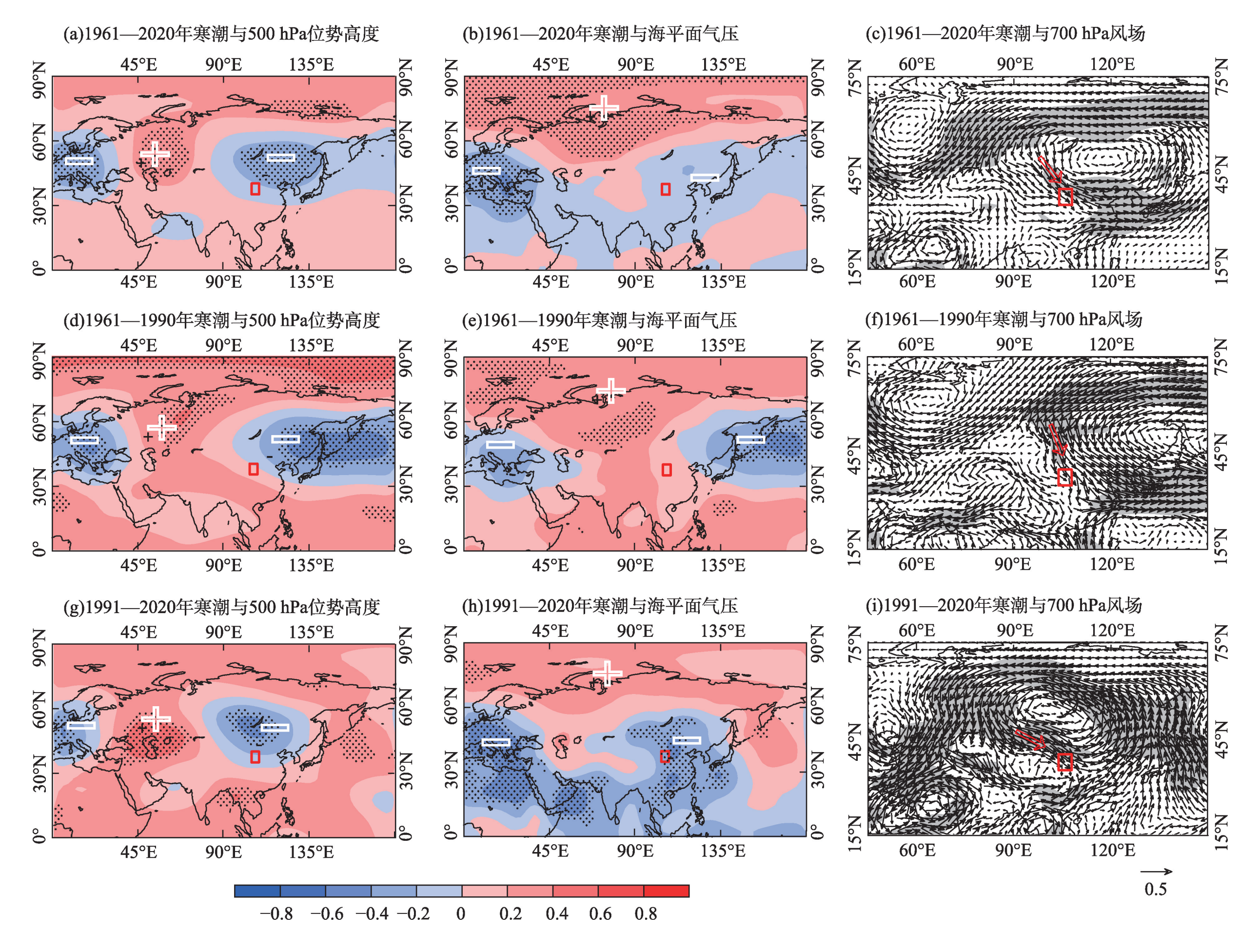
Fig. 5 The monthly variation of cold wave, strong cold wave, exceptionally strong cold wave, and their different durations in Ningxia

潮”简称)年际及年代际变化的环流成因。

2.3.1　宁夏近60 a寒潮与大气环流相关关系　寒潮与大气环流在中高纬地区呈现显著相关关系,相对于1961—2020年及突变前的相关分布趋于一致,突变后则存在一定差异,但整体上影响宁夏寒潮的高相关区较为一致(图6)。1961—2020年,500 hPa环流场上欧洲西岸、乌拉尔山、贝加尔湖西侧存在显著的“负、正、负”相关中心;海平面气压场在欧洲西岸、极地至贝加尔湖一带的高纬地区、我国东北为“负、正、负”相关中心;700 hPa风场上寒潮则与贝加尔湖西侧的偏北风呈现出显著正相关(图6a~图6c)。突变前相关关系分布及高相关区与1961—2020年基本一致(图6d~图6f)。突变后,500 hPa在欧洲西岸、乌拉尔山、贝加尔湖附近为“负、正、负”显著相关中心;海平面气压场中高纬仍为“负、正、负”相关中心,但是极地至贝加尔湖一带的正相关区均不显著、欧洲西岸及我国东部中低纬则表现为大范围显著的负相关区;700 hPa风场与贝加尔湖西侧的偏北风虽然呈现出显著正相关,但是其范围更大(图6g~图6i)。

2.3.2　宁夏近60 a寒潮突变前后大气环流分布特征

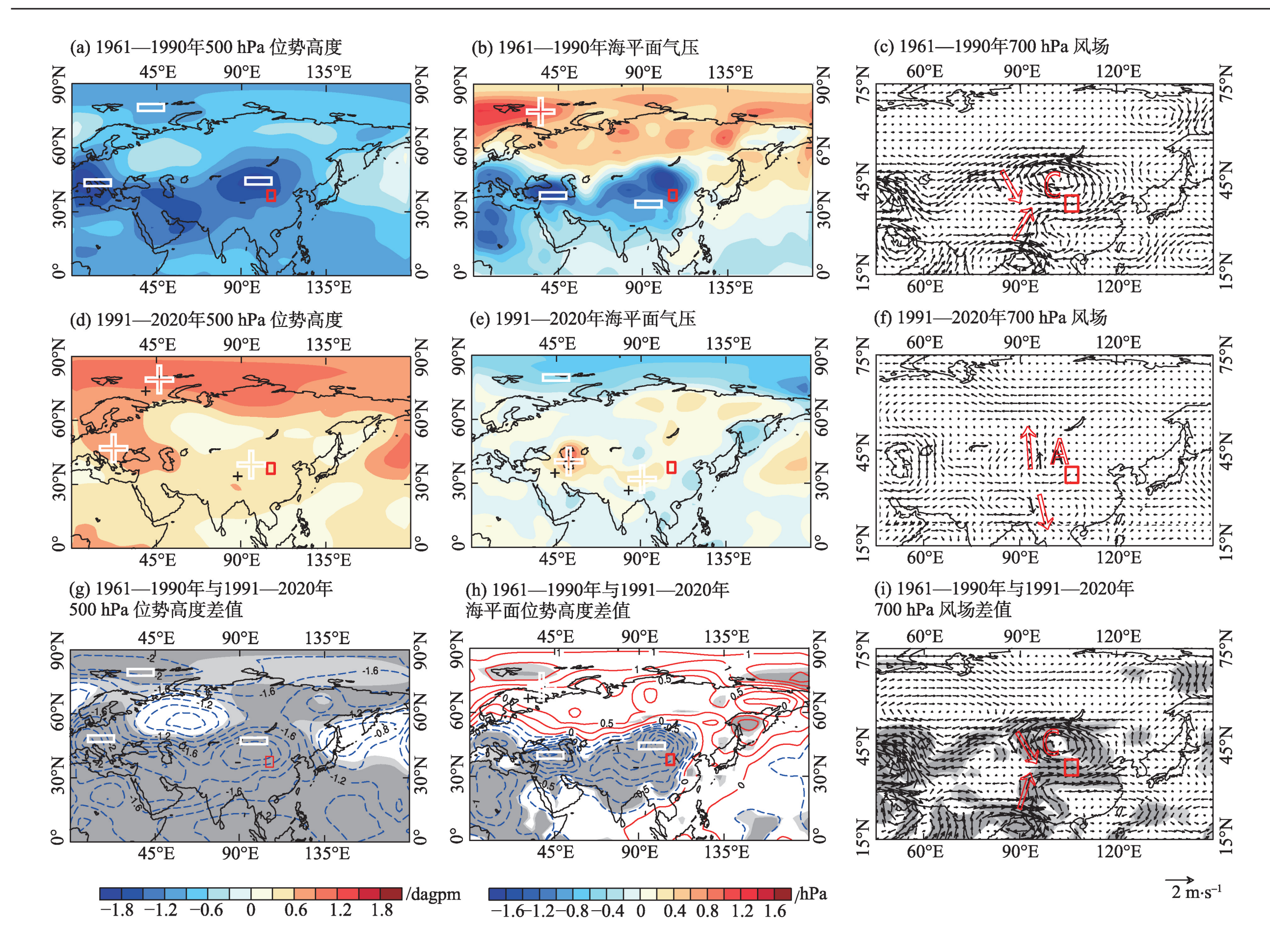
突变前,500 hPa环流场中高纬地区以负距平控制,巴伦支海、地中海、贝加尔湖及南侧地区为负距平中心,贝加尔湖、日本海对应一脊一槽,使得宁夏受高压脊的脊前西北气流控制,东亚大槽较常年深厚,有利于极地冷空气南下(图7a);海平面气压场的极地由正距平控制,里海及我国大陆为明显负距平中心,该北高南低的配置有利于西伯利亚高压和冬季风偏强(图7b);700 hPa风场上贝加尔湖南侧的气旋性环流与来自孟加拉湾西南气流共同加强了为宁夏输送冷空气的西北气流(图7c)。突变后则明显相反,500 hPa表现为正距平控制、东亚大槽



注:黑色点状区域及黑色阴影为通过α = 0.05的显著性检验,红色箭头为风向,红色方框代表宁夏。

图6　1961—2020年、1961—1990年及1991—2020年的宁夏寒潮与500 hPa位势高度、海平面气压、700 hPa风场的相关关系分布

Fig. 6　Distribution of correlation between cold wave in Ningxia and geopotential height on 500 hPa, sea level pressure field, wind field on 700 hPa during 1961-2020, 1961-1990, and 1991-2020



注:彩色阴影、蓝色及红色等值线为距平值,黑色等值线为环流平均;(c)、(f)和(i)中黑色阴影由浅到深代表通过0.05、0.1显著性检验,红色箭头为风向,红色方框代表宁夏。下同。

图7 1961—1990年、1991—2020年及两者差值的500 hPa环流、海平面气压、700 hPa风场合成分布

Fig. 7 The composite anomaly spatial distribution of geopotential height on 500 hPa, sea level pressure field and wind field on 700 hPa for 1961-1990, 1991-2020 and their difference

偏弱,海平面气压场中高纬为北低南高,700 hPa风场无偏北气流的影响,不利于极地冷空气活跃南下(图7d~图6f)。突变前与突变后正、负差值中心大都通过了0.05的显著性水平检验(图7g~图7i)。因此,突变前后环流场发生了显著变化,突变前环流形势整体利于极地冷空气活跃南下,使得宁夏寒潮则偏多,突变后则相反。20世纪80年代后期以来全球明显增暖,说明宁夏寒潮的长期变化趋势与全球变暖关系密切[32]。

2.3.3 宁夏寒潮异常年大气环流分布特征 为进一步解示宁夏寒潮年际异常的环流成因,挑选出1961年年际异常的年及突变前后寒潮典型异常年进行分析,其中,寒潮异常年份如表4所示。

对比寒潮和环流的相关分布(图6),异常年环流差值分布的差值中心基本对应其高相关中心,各时间段关键环流系统也较为一致(图8)。1961—2020年,500 hPa中高纬存在"负、正、负"带状波列,即欧洲西岸、我国东北至日本海为两个明显负中

表4 1961—2020年、1961—1990年及1991—2020年宁夏寒潮异常年份

Tab. 4 The composite anomaly years of cold waves in Ningxia for 1961-2020, 1961-1990, and 1991-2020

	异常偏多年	异常偏少年
1961—2020年	1962年、1965年、1970年、1981年、1987年、2006年	1992年、1994年、1996年、2011年、2013年、2017年
1961—1990年	1965年、1970年、1981年、1987年	1961年、1973年、1985年、1989年
1991—2020年	2006年、2010年、2019年、2020年	1992年、1996年、2011年、2017年

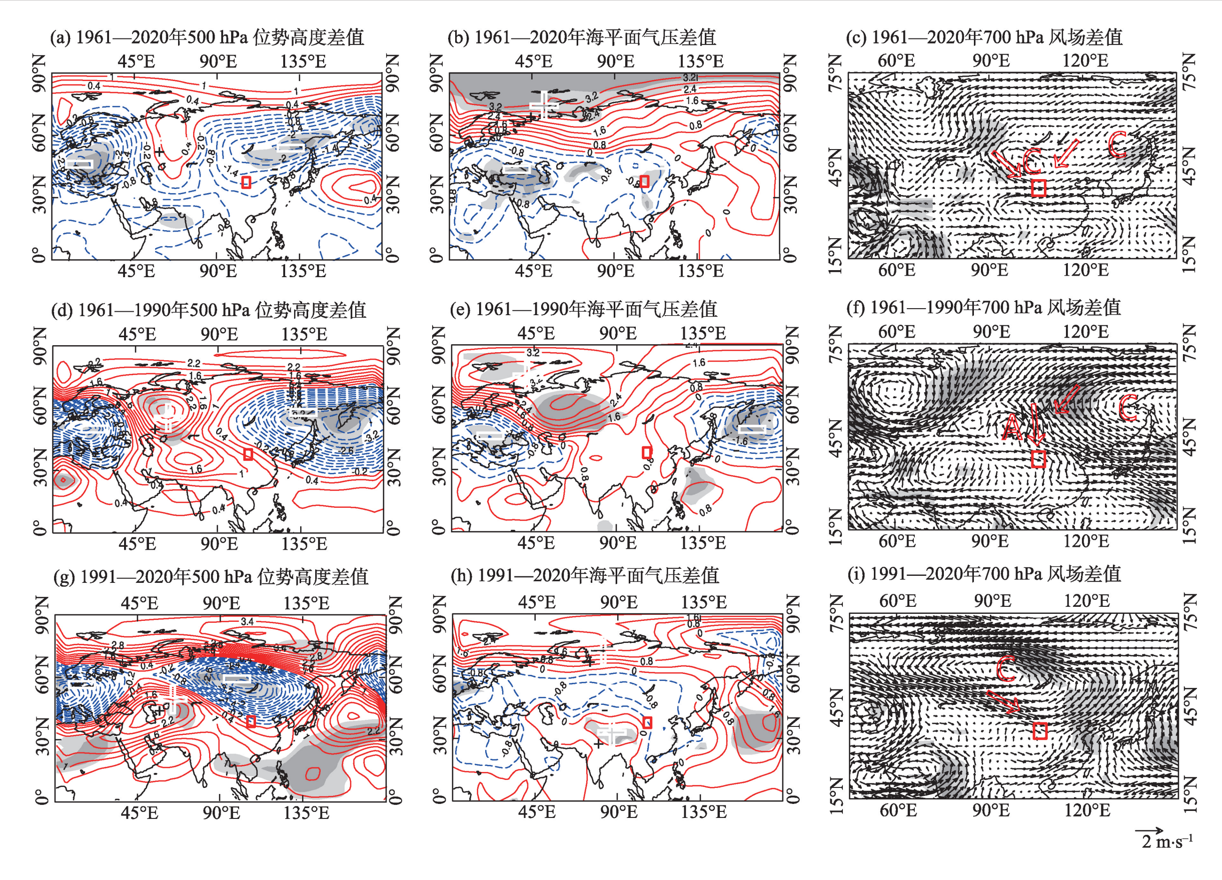


图8　1961—2020年、1961—1990年、1991—2020年宁夏寒潮偏多年与偏少年500 hPa位势高度、海平面气压、700 hPa风场的差值分布

Fig. 8　Distribution of difference in years with more and less cold waves in Ningxia of geopotential height on 500 hPa, sea level pressure field, wind field on 700 hPa during 1961-2020, 1961-1990, and1991-2020

心,乌拉尔山为明显正中心,说明偏多年乌山阻高偏强、东亚大槽深厚,且冷空气更为活跃;海平面气压在地中海、我国大部为负中心,新地岛周围为正中心,偏多年利于极地冷高压活跃南下;700 hPa风场在贝加尔湖南侧及鄂霍次克海为异常气旋性环流,偏多年利于其西侧形成两支偏北气流,为宁夏输送冷空气(图8a~图8c)。与1961—2020年相比,突变前与其相似(图8d~图8f),而突变后的海平面气压场和风场存在差异(图8h~图8i),突变后偏多年极地及青藏高原冷高压系统更强,700 hPa风场贝加尔湖西侧强大气旋性环流利于强盛的偏北气流侵袭宁夏。

综上所述,寒潮突变前后存在明显相反的环流特征,而1961—2020年及突变前后宁夏寒潮环流分布虽然存在一些差异,但宁夏寒潮主要受影响的关键环流系统较一致,即当乌山阻高异常偏强(偏弱)、东亚大槽偏强(偏弱)、欧洲西岸500 hPa高度偏低(偏高)、极地地面冷高压活跃(不活跃)、贝加

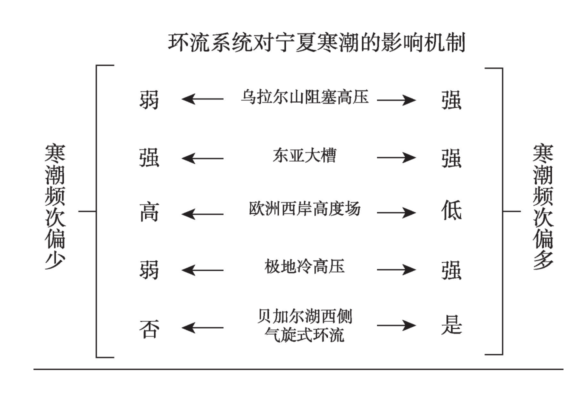


图9　环流系统对宁夏寒潮的影响机制示意图

Fig. 9　The diagram of the impact mechanism of circulation system on the cold wave in Ningxia

尔湖西侧为气旋(反气旋)性环流为主时,有利于(不利于)中高纬冷空气活跃南下,宁夏寒潮则偏多(偏少)(图9)。

3　结 论

(1) 宁夏各强度寒潮表现为"东多西少、北多南

少”的分布特征，高发区为盐池，其次是石嘴山，吴忠、中宁和泾源最少；寒潮、强寒潮、超强寒潮发生频次为81.7站次、25.7站次及6.5站次，分别占全年总寒潮的71.7%、22.6%和5.7%，其中，寒潮以24 h和48 h历时为主，强寒潮及超强寒潮不同历时的比例相当。

（2）宁夏寒潮、强寒潮、超强寒潮分别以4.5站次·$(10a)^{-1}$、2.8站次·$(10a)^{-1}$及0.18站次·$(10a)^{-1}$的速率减少，其中短历时寒潮明显减少，而长历时寒潮有所增加；各类寒潮于1960s—1990s波动减少，1960s最多，1990s最少，2000年以后波动增多，20世纪80年代后期寒潮与强寒潮发生突变。

（3）宁夏10月—次年4月各强度寒潮频发，该时段寒潮、强寒潮、超强寒潮占全年各自的99%、98%、95%，均存在1—4月递减、10—12月递增的逐月变化特征，各历时峰值存在差异，24 h和72 h强寒潮、24 h超强寒潮为4月最多，其余历时均为1月最多。

（4）受全球增暖影响，宁夏寒潮突变前后的大气环流呈现出完全相反的分布特征，突变前环流形势整体利于极地冷空气活跃南下，突变后则不然。1961—2020年及突变前后宁夏寒潮的关键影响系统较为一致，当乌山阻高异常偏强、东亚大槽偏强、欧洲西岸高度场异常偏低，而贝加尔湖西侧以气旋性环流为主、地面高纬冷高压活跃时，有利于中高纬冷空气活跃南下，宁夏寒潮则偏多，反之则偏少。

参考文献(References)：

[1] Planchon O, Quénol H, Irimia L, et al. European cold wave during February 2012 and impacts in wine growing regions of Moldavia (Romania)[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2015, 120(3-4): 469-478.

[2] 薛一波, 黄双燕, 张小啸, 等. 新疆2018年冬季雨雪风沙强降尘事件[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 681-690. [Xue Yibo, Huang Shuangyan, Zhang Xiaoxiao, et al. Study on the strong winter airborne dustfall mixed rain and snow events in Xinjiang, China in 2018[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 681-690.]

[3] 李东欢, 邹立维, 周天军. 全球1.5 ℃温升背景下中国极端事件变化的区域模式预估[J]. 地球科学进展, 2017, 32(4): 446-457. [Li Donghuan, Zou Liwei, Zhou Tianjun. Changes of extreme indices over China in response to 1.5 ℃ warming projected by a regional climate model[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(4): 446-457.]

[4] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 808-825. [Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(5): 808-825.]

[5] 陶诗言. 十年来我国对东亚寒潮的研究[J]. 气象学报, 1959, 30(3): 226-230. [Tao Shiyan. Research on East Asian cold wave in the past ten years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1959, 30(3): 226-230.]

[6] 罗继, 代君梅, 杨虎, 等. 1971—2014年新疆区域寒潮气候特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 309-315. [Luo Ji, Dai Junmei, Yang Hu, et al. Climatic characteristics of cold wave in Xinjiang during the period of 1971-2014[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 309-315.]

[7] 康志明, 金荣花, 鲍媛媛. 1951—2006年期间我国寒潮活动特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 420-428. [Kang Zhiming, Jin Ronghua, Bao Yuanyuan. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951-2006[J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(2): 420-428.]

[8] 周星妍, 朱伟军, 顾聪. 冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响[J]. 大气科学, 2015, 39(5): 978-990. [Zhou Xingyan, Zhu Weijun, Gu Cong. Possible influence of the variation of the northern Atlantic storm track on the activity of cold waves in China during winter[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(5): 978-990.]

[9] 万瑜, 曹兴, 窦新英, 等. 中天山北坡春季寒潮型暴雪致灾成因分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 478-486. [Wan Yu, Cao Xing, Dou Xinying, et al. Disaster-causes of a cold wave snowstorm in the north slope of middle Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(3): 478-486.]

[10] 王遵娅, 丁一汇. 近53年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1068-1076. [Wang Zunya, Ding Yihui. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(6): 1068-1076.]

[11] 钱维宏, 张玮玮. 我国近46年来的寒潮时空变化与冬季增暖[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1266-1278. [Qian Weihong, Zhang Weiwei. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(6): 1266-1278.]

[12] 魏凤英. 气候变暖背景下我国寒潮灾害的变化特征[J]. 自然科学进展, 2008, 18(3): 289-295. [Wei Fengying. The changing characteristics of cold wave disasters under climate warming[J]. Progress in Chinese Natural Sciences, 2008, 18(3): 289-295.]

[13] 林晶, 陈家金, 陈惠. 近45年福建省寒潮的时空分布及对农业生产的影响[J]. 亚热带农业研究, 2007, 3(1): 57-59. [Lin Jin, Chen Jiajin, Chen Hui. Spatiotemporal distribution of cold current and its impacts on agricultural production in Fujian Province in the recent 45 years[J]. Subtropical Agriculture Research, 2007, 3

(1): 57-59.]

[14] 阎琦, 陆井龙, 田莉, 等. 1971—2011年辽宁寒潮时空分布特征[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(4): 63-69. [Yan Qi, Lu Jinglong, Tian Li, et al. Spatial and temporal distributions of cold wave from 1971 to 2011 in Liaoning Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014, 30(4): 63-69.]

[15] 胡春丽, 李辑, 郭婷婷, 等. 1961—2016年东北地区冬季寒潮事件变化特征及其对区域气候变暖的响应[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1755-1763. [Hu Chunli, Li Ji, Guo Tingting, et al. Variation characteristics of winter cold wave events in Northeast China and its response to regional warming during 1961-2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6): 1755-1763.]

[16] 李红英, 林纾, 王云鹏, 等. 1961—2017年京津冀地区寒潮活动特征[J]. 干旱气象, 2022, 40(1): 41-48. [Li Hongying, Lin Shu, Wang Yunpeng, et al. Characteristics of cold wave activities in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1961 to 2017[J]. Arid Meteorology, 2022, 40(1): 41-48.]

[17] Meral D. The large-scale environment of the European 2012 high-impact cold wave: Prolonged upstream and downstream atmospheric blocking[J]. Weather, 2017, 72(10): 297-301.

[18] 张弛, 沈新勇, 张玲, 等. 一次寒潮过程中冷堆增强的动力原因分析[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 394-402. [Zhang Chi, Shen Xinyong, Zhang Ling, et al. The dynamical cause of cold dome's intensification in a cold wave process[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 394-402.]

[19] 虞越越, 严睿恺, 蔡鸣. 平流层大气质量环流脉冲事件与北半球冬季大陆尺度寒潮低温的次季节尺度预测[J]. 气象科技进展, 2021, 11(3): 92-102. [Yu Yueyue, Yan Ruikai, Cai Ming. Potential use of stratospheric meridional mass circulation signals in the sub-seasonal forecasts of continental-scale cold events in NH winter[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(3): 92-102.]

[20] Jeong J H, Ho C H. Changes in occurrence of cold surges over East Asia in association with Arctic Oscillation[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(14): 256-257.

[21] 朱晨玉, 黄菲, 石运昊, 等. 中国近50年寒潮冷空气的时空特征及其与北极海冰的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 21(12): 12-20. [Zhu Chenyu, Huang Fei, Shi Yunhao, et al. Spatial-temporal patterns of the cold surge events in China in recent 50 years and its relationship with Arctic sea ice[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 21(12): 12-20.]

[22] Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. Interdecadal variability of East Asian winter monsoon and links to global climate change [J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(5): 693-713.

[23] 乔雪梅, 刘普幸. 中国北方地区寒潮时空特征及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 357-367. [Qiao Xuemei, Liu Puxing. The temporal and spatial characteristics and genesis of cold wave in northern China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42 (2): 357-367.]

[24] 刘美娇, 李颖, 孙美平. 1961—2018年河西走廊寒潮频次时空变化特征及其环流影响因素研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 801- 811. [Liu Meijiao, Li Ying, Sun Meiping. Spatial- temporal variation of cold wave frequency and its influencing factors of circulation in Hexi Corridor during 1961-2018[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 801-811.]

[25] 唐孟琪, 曾刚. 近30多年中国东北地区春季寒潮的年代际变化及其可能原因[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(4): 473-486. [Tang Mengqi, Zeng Gang. Decadal variability of spring cold wave across Northeast China in the past 30 years and its possible causes [J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(4): 473-486.]

[26] 陈豫英, 陈楠, 聂金鑫, 等. 2011年3月宁夏一次寒潮天气过程诊断[J]. 干旱气象, 2012, 30(1): 88-93. [Chen Yuying, Chen Nan, Nie Jinxin, et al. Diagnosis of a cold wave weather event in march 2011 in Ningxi[J]. Arid Meteorology, 2012, 30(1): 88-93.]

[27] 陈豫英, 陈楠, 邵建, 等. 2008年12月两次寒潮天气对比分析[J]. 气象, 2009, 35(11): 29-38. [Chen Yuying, Chen Nan, Shao Jian, et al. Comparative analyses of two cold wave processes in December 2008[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(11): 29-38.]

[28] 周翠芳, 张广平, 杨海山. 宁夏冬季寒潮天气过程对比分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 142-147. [Zhou Cuifang, Zhang Guangping, Yang Haishan. Contrastive analysis of two cold wave weather processes in winter of Ningxia Region[J]. Arid Meteorology, 2009, 27(2): 142-147.]

[29] 冯建民. 宁夏天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2012. [Feng Jianmin. Ningxia Weather Forecast Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.]

[30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]

[31] 马力, 韦志刚, 李娴茹, 等. 2000年前后我国寒潮活动特征的比较分析[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6): 1757-1772. [Ma Li, Wei Zhigang, Li Xianru, et al. Comparative analysis of the cold surge characteristics over China before and after 2000[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6): 1757-1772.]

[32] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(Ⅰ): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 3 (1): 1-5. [Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. National Assessment Report of Climate Change (Ⅰ): Climate change in China and its future trend[J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 3(1): 1-5.]

Change characteristics and circulation anomaly analysis of cold wave in Ningxia over the past 60 years

HUANG Ying[1,2,3], WANG Suyan[1,2,3], MA Yang[1,2,3], WANG Dai[1,2,3], ZHANG Wen[1,2,3], WANG Fan[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agricultural in Dry Areas Regions, CMA, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Key Lab for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Ningxia Climate Center, Yingchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: Based on daily temperature observation data and reanalysis data of the geopotential height, sea level pressure, and wind field from 1961 to 2020, the characteristics of spatial and temporal change of cold waves, strong cold waves, and exceptionally strong cold waves lasting 24 h, 48 h, and 72 h were studied in Ningxia over the past 60 years. The causes of atmospheric circulation anomalies of cold waves were also revealed. The results show the following: (1) In the past 60 years, cold waves of different intensities and different durations in Ningxia consistently showed the distribution characteristics of "shifting eastwards and northwards." (2) The cumulative frequencies of cold waves, strong cold waves, and exceptionally strong cold waves in the region accounted for 71.7%, 22.6%, and 5.7% of the total annual cold wave frequencies, respectively, among which cold waves dominated by process lasting 24 h and 48 h. The proportions of various durations for strong cold waves and exceptionally strong cold waves were equivalent. They mainly occured in October to April, during which the accumulated cold waves, strong cold waves, and exceptionally strong cold waves in the region accounted for 99%, 98%, and 95% of those throughout the year, and there was a decreasing trend from January to April and increasing trend from October to December. (3) In the past 60 years, the cold waves, strong cold waves, and exceptionally strong cold waves have been decreasing at a rate of 4.5, 2.8, and 0.18 per station every 10 years, respectively. Among them, the frequencies of waves of 24 h and 48 h as short durations were decreasing, but that of waves of 72 h as a long duration was decreasing. All types of cold waves decreased from the 1960s to the 1990s, reaching a minimum in the 1990s and increasing since the 2000s, with a sudden change around 1990. (4) Under the influence of global warming, the atmospheric circulation showed completely the opposite distribution characteristics between before and after the sudden change of cold waves in Ningxia. The key systems influencing cold waves in Ningxia are consistent. When the blocking high pressure in the Ural Mountains was stronger, the East Asian trough was deeper, the west Pacific subtropical high was weaker, the western side of Lake Baikal was dominated by cyclonic circulation, and cold high pressure at the ground was active, this was conducive to the southward movement of cold air in middle and high latitudes, and more cold waves in Ningxia.

Keywords: cold wave; evolutionary characteristics; atmospheric circulation; anomaly analysis; Ningxia